

Mônica Pereira Marcondes

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Rua do Lago, 876, Cidade Universitária
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-900
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: marcondesmo@usp.br

Cecília Mattos Mueller

ArqEficiente Projeto e Consultoria em
Arquitetura Ltda.
Rua Teodoro Sampaio, 1704, cj. 104, Pinheiros
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05406-100
Tel.: (11) 3637-8005
E-mail: cecimm@gmail.com

Rafael Silva Brandão

Departamento de Arquitetura
Universidade Federal de São João Del-Rei
Av. Visconde do Rio Preto, s/n, Sala RE 3.05,
Colônia do Bengo
São João Del Rei - MG - Brasil
Caixa-Postal 615223
CEP 36301-360
E-mail: rafael.brandao@superig.com.br

Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: arprata@terra.com.br

Gustavo Brunelli

BDSP Partnersership
Summit House 27 Sale Place
London W2 1YR - UK
Tel.: + (44) 2072988383
E-mail: gustavo.brunelli@bdsp.com

Gisele Saveriano De Benedetto Paes Leme

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: giseledb@hotmail.com

Joana Carla Soares Gonçalves

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: jocarch@usp.br

Denise Helena Silva Duarte

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: dhduarte@terra.com.br

Anésio Barros Frota

Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética
Departamento de Tecnologia da Arquitetura
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-4571
E-mail: arfrota@uol.com.br

Recebido em 03/03/09

Aceito em 17/04/09

Conforto e desempenho térmico nas edificações do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro

Thermal comfort and performance in the buildings of the new research centre of Petrobras in Rio de Janeiro

Mônica Pereira Marcondes

Cecília Mattos Mueller

Rafael Silva Brandão

Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Gustavo Brunelli

Gisele Saveriano De Benedetto Paes Leme

Joana Carla Soares Gonçalves

Denise Helena Silva Duarte

Anésia Barros Frota

Resumo

Este artigo apresenta um estudo do desempenho térmico dos edifícios do novo centro de pesquisas da Petrobras, CENPES II, no Rio de Janeiro, incluindo edifícios naturalmente ventilados e edifícios condicionados artificialmente. O projeto foi objeto de um concurso nacional em 2004, com um programa de 100.000m² e dez edifícios. O edital propôs quatro edifícios naturalmente ventilados e outros seis artificialmente climatizados, pelas exigências do uso e especificidades da função. Nos edifícios com ventilação natural foi aplicado um modelo adaptativo de conforto térmico e as avaliações de desempenho foram realizadas com o suporte de ferramentas avançadas de simulação computacional. Na maioria dos ambientes com ventilação natural encontrou-se condições similares ao clima externo à sombra, comprovando a adequação da arquitetura ao clima. Nos ambientes de trabalho em que a climatização artificial foi colocada como premissa foi identificado, inicialmente, um potencial de 30% de ventilação natural durante as horas de ocupação, justificando a verificação das possibilidades do modo-misto de climatização.

Palavras-chave: Conforto térmico. Ventilação natural. Eficiência energética. Clima tropical. Simulação computacional.

Abstract

This paper presents the a study of the thermal performance of the new Petrobras research centre, CENPES II, in Rio Janeiro, including free running and air-conditioned buildings. The architectural design was the subject of a national competition in 2004, encompassing over 100.000m² and ten buildings. According to the design brief, four buildings should be naturally ventilated, whilst six had to be either air-conditioned, due to specific occupation requirements. In the case of naturally ventilated buildings, adaptive comfort was applied as performance criterion, and the environmental assessments were supported by advanced simulation tools. In most of the spaces within the free-running buildings the performance assessments showed environments with similar conditions to the exterior. Considering the working spaces pre-determined to be air-conditioned, the potential for natural ventilation in the working spaces reached 30% of occupation hours, justifying the case for the mixed-mode strategy.

Keywords: Thermal comfort. Natural ventilation. Energy efficiency. Tropical climate. Simulation.

Introdução

Este trabalho trata do desempenho térmico dos edifícios do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro, CENPES II, localizado às margens da Baía de Guanabara, na Ilha do Fundão.

O projeto foi objeto de um concurso nacional em 2004. A proposta vencedora foi a da equipe Zanettini Arquitetura S.A., com co-autoria de José Wagner Garcia (Figura 1). O complexo cobre cerca de 100.000 m² de área construída (Figura 2), com o objetivo de complementar as instalações do centro de pesquisas existente, CENPES I, com laboratórios, escritórios, um centro de convenções e edifícios de apoio.

O edital impôs medidas em prol do conforto ambiental, da eficiência energética e outras ligadas ao impacto ambiental da construção e à eficiência no consumo de água e energia. Essas medidas são:

1. Orientação dos edifícios de acordo com o impacto da radiação solar,
2. Forma arquitetônica de acordo com os princípios da arquitetura bioclimática,
3. Uso apropriado dos materiais de acordo com as condições climáticas,
4. Proporção das áreas envidraçadas de fachada a fim de minimizar os ganhos térmicos e maximizar o aproveitamento da luz natural,
5. Proteções solares,
6. Ventilação natural,
7. Luz natural,
8. Cuidado com o impacto ambiental dos materiais,
9. Uso racional da água, coleta de água de chuva e aproveitamento de águas cinzas,
10. Uso da vegetação para a qualidade ambiental do conjunto.

O interesse da Petrobras pelas questões ambientais levou à busca pela certificação LEED, *Leadership in Environmental and Energy Design*, o que trouxe mais uma série de requisitos para o projeto. Para a elaboração dos aspectos ambientais do edital e a seleção do projeto, a Petrobras contou com pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, LabEEE, e do Laboratório de Conforto Ambiental, LabCon, ambos da Universidade Federal de Santa Catarina, e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O projeto vencedor foi fortemente influenciado pela arquitetura bioclimática carioca. A implantação mostra uma composição predominantemente horizontal, com os principais edifícios orientados sobre os eixos norte-sul e leste-oeste (Figura 3), e os espaços de transição têm um papel fundamental na qualidade ambiental do projeto.

O processo de projeto foi guiado por avaliações de desempenho ambiental desde o estágio conceitual, executadas pelo Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) do Departamento de Tecnologia, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, (FAUUSP). Além de influenciar a arquitetura, os estudos de desempenho ambiental contribuíram também para os projetos de paisagismo, sistemas de climatização e iluminação artificial.



Fonte: Zanettini Arquitetura (2009)

Figura 1 - Modelo físico do CENPES II, visto do Sudeste

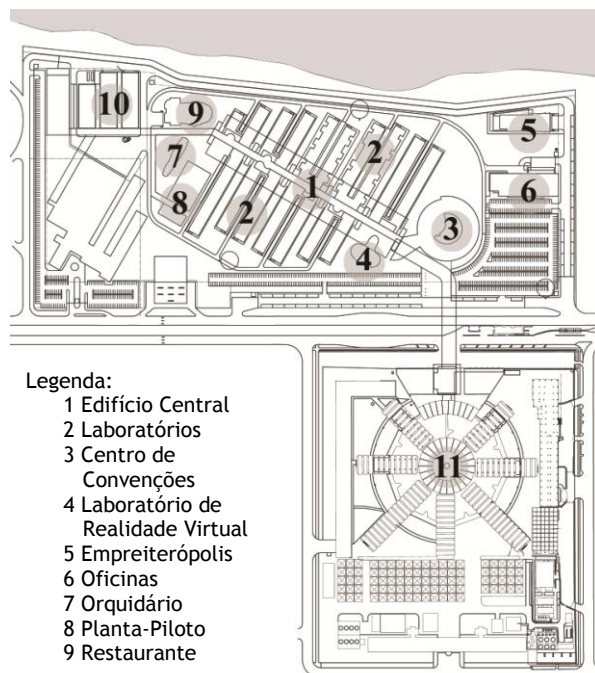


Figura 2 - Implantação do CENPES II

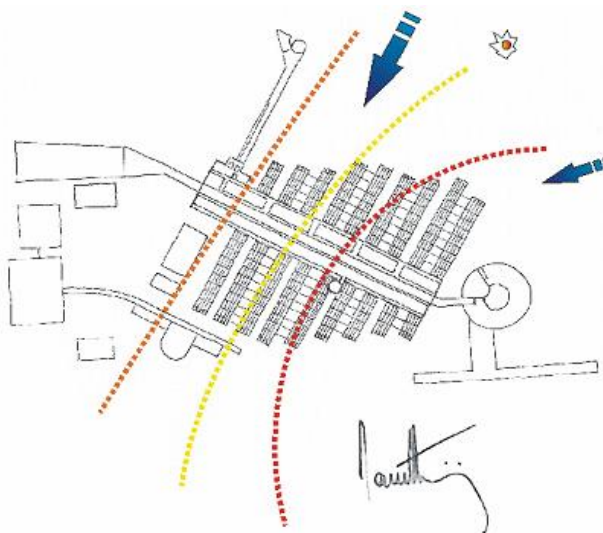


Figura 3 - Croqui do arquiteto, destacando os edifícios principais da composição arquitetônica

De acordo com o programa de necessidades, quatro dos dez edifícios foram projetados para que a maioria de seus ambientes fosse ventilada naturalmente: Empreiteirópolis (edifício de pessoal e manutenção), Planta-Piloto (edifício de pesquisa), Oficinas (edifício de construção de modelos físicos) e Central de Utilidades (edifício de entrada dos sistemas municipais de utilidades, incluindo água, energia elétrica, uma central de geração de energia e utilidades para os laboratórios).

Os outros seis foram planejados para serem parcialmente ou completamente condicionados artificialmente: Laboratórios, Prédio Central

(escritórios), Centro de Convenções, Centro de Realidade Virtual, Restaurante e Orquidário.

Método para avaliação de desempenho térmico

Considerações metodológicas

Trabalhando com a arquitetura desde os estágios iniciais, tinha-se por objetivo fornecer parâmetros e diretrizes de desempenho térmico e energético que pudessem ser incorporados ao desenho dos

edifícios, e não apenas verificar o desempenho *a posteriori*.

Não havia, ainda, durante o desenvolvimento do trabalho, em 2004 e 2005, parâmetros pré-estabelecidos para o nível de desempenho energético desejado para as edificações brasileiras. Do mesmo modo, não havia um valor mínimo para o número de horas em conforto para edifícios com condicionamento natural. Por isso, os estudos basearam-se principalmente em análises comparativas de alternativas de projeto, avaliando-se o impacto de alterações arquitetônicas no desempenho térmico e na carga térmica resultante.

O desempenho térmico foi avaliado na seguinte seqüência:

- (a) construção de uma base climática horária anual a partir de dados da estação meteorológica do Aeroporto Internacional Tom Jobim¹, com dados de 1998 a 2004 (METAR, 2005). A radiação solar foi estimada com o Meteonorm (METEOTEST, 2003);
- (b) identificação do período crítico (mês com a temperatura média mais alta, fevereiro de 2003) e um dia estável desse mês (09/02) com o objetivo de realizar estudos específicos de carga térmica máxima e fluxo de calor pela envoltória;
- (c) estabelecimento de parâmetros de conforto para espaços condicionados naturalmente e artificialmente;
- (d) estudos preliminares para a seleção de ambientes críticos, zoneamento térmico, esquemas de ocupação, materiais e cargas internas;
- (e) simulação de dinâmica de fluidos para estabelecer fluxos de ar ao redor dos edifícios, coeficientes de pressão, velocidades nas aberturas e coeficientes de troca de calor por convecção;
- (f) simulação termodinâmica dos edifícios, sem considerar o condicionamento artificial, para determinar potencialmente o número de horas em conforto;
- (g) especificação dos parâmetros de modo misto para ambientes onde o edital requeria o uso de condicionamento artificial ou com potencial insuficiente para uso de ventilação natural;
- (h) simulação das estratégias de ventilação natural, de modo misto e dos ambientes condicionados artificialmente; e

- (i) avaliação dos resultados e propostas de mudanças nas características arquitetônicas, materiais e critérios de operação dos edifícios.

Parâmetros de conforto

Conceituação e referências teóricas

Para as condições ambientais de espaços de trabalho no Brasil são duas as referências: NR 15 (BRASIL, 1978) e NR 17 (BRASIL, 1973). A primeira refere-se principalmente a ambientes de calor extremo, tais como indústrias, e recomenda períodos de descanso em função do tempo de exposição a temperaturas acima de um valor determinado, enquanto a segunda afirma apenas que o ambiente deve ser adequado às características psico-fisiológicas dos trabalhadores e à natureza da tarefa. Para ambientes em que há demanda intelectual e necessidade de atenção constante, a NR 17 recomenda os seguintes parâmetros: temperatura efetiva entre 20°C e 23°C, umidade relativa do ar não inferior a 40% e velocidade do ar não superior a 0,75 m/s.

Nesse projeto, a NR 15 não se aplicaria aos edifícios com condicionamento artificial parcial ou total, já que não há espaços com geração extrema de calor. No caso da NR 17, embora ela se aplique teoricamente a todos os ambientes no complexo, seria impossível atender os seus parâmetros sem a utilização de condicionamento artificial, nas condições climáticas locais.

Para ambientes condicionados artificialmente, existem ainda mais duas referências: a NBR 6401 (ABNT, 1980) e a Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior (ANVISA, 2003). Em ambos os casos, os intervalos recomendados para temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa do ar (UR) são: TBS = 23 - 26°C e UR = 40 - 65%; TBS_{max} = 26,5 - 27 °C e UR_{max} = 65%; TBS_{max} = 28 °C e UR = 70% (para áreas de acesso). Considerando a velocidade do ar a 1,5m ($v_{a,1,5m}$) de 0,025 a 0,25 m/s.

Também foram utilizadas duas referências internacionais: ISO 7730 (1994) e ASHRAE-55 (1992)². A primeira estima o Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD) em um dado ambiente e recomenda valores inferiores a 10-15%. No entanto, tais parâmetros limitam-se às seguintes condições: TBS entre 10°C e 30°C, UR entre 30% e 70% e velocidade do ar abaixo de 1 m/s. Por sua

¹ Dados gentilmente cedidos pelo Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (MASTER/IAG/USP).

² No início do desenvolvimento do projeto (2004), a versão corrente da ASHRAE 55 datava de 1992. A versão atual, incluindo o conceito de modelo adaptativo, foi publicada oficialmente durante o andamento do projeto.

vez, a segunda estabelece zonas de conforto diferenciadas para verão e inverno, permitindo um PPD de 20%, mais apropriado para as condições locais. A zona de conforto da ASHRAE 55 (1992) é dada por temperatura operativa (t_o) e umidade relativa do ar (UR), como segue: no inverno, de 20 a 23,5°C e 60% UR, correspondendo à temperatura efetiva de 20 e 23,5°C (ET*); no verão, de 22,5 a 26°C, também com 60% UR, correspondendo à temperatura efetiva de 23 e 26°C, e a velocidade do ar nunca deve ser superior a 0,8 m/s.

No entanto, a aplicação dessas normas internacionais a edifícios naturalmente ventilados ou com sistemas mistos de condicionamento ainda era discutível. Os limites de temperatura e umidade para a aplicação das mesmas descartavam sua utilização para situações de calor e alta umidade.

De Dear, Bragger e Cooper (1997) discutiram o assunto no relatório ASHRAE RP-884 (2004), baseado em um experimento com 20.700 ocupantes de 160 edifícios em 9 países dentre eles Estados Unidos, Inglaterra, Tailândia e Indonésia. O resultado indica que ocupantes de edifícios naturalmente ventilados apresentam maiores tolerâncias à variação das condições térmicas internas, fato não contemplado nas adaptações do modelo de Fanger (1970) utilizadas na ASHRAE 55 e ISO 7730 (ISSO, 1994). O relatório propõe um índice de conforto adaptativo, apresentando um modelo empírico que incorpora questões como aclimação, vestuário, comportamento e tolerância a variações climáticas.

Nesse índice, o conforto interno é função das condições externas médias. O modelo é baseado na Nova Temperatura Efetiva (ET*), definida como a t_o de um ambiente a 50% UR, que causaria as mesmas trocas de calor sensível e latente que as experimentadas pelo usuário no ambiente em estudo. A temperatura neutra (t_n), que define a zona de conforto, é determinada a partir da ET* média mensal e varia de acordo com o clima local e com a época do ano. Desse modo, ao invés das regulamentações existentes até então, foi explorada a possibilidade de se utilizar o modelo adaptativo, com o objetivo de ampliar os períodos de ventilação natural e testar o modo misto.

Parâmetros de desempenho térmico para ambientes condicionados artificialmente

Os parâmetros para os edifícios condicionados artificialmente foram determinados pela ISO 7730 e normas correlatas (ISO 7726, 1998; ISO 8996, 1990; ISO 9920, 1995), e confrontados com as referências nacionais. Estudos exploratórios determinaram arranjos de TBS, UR e v_a que produzissem um PPD < 10%, assumindo-se:

- (a) taxa metabólica (M) para atividade sedentária (ISO 8996): $M=70\text{W/m}^2$ (1,2 met);
- (b) resistência térmica da roupa I_{clo} (ISO 9920) de 0,5 clo (camisa de manga curta, calças leves, roupa de baixo, meias e sapatos);
- (c) TRM = TBS, já que os fechamentos são sombreados e/ou isolados. Desse modo (ISO 7726), $t_o = \text{TBS}$; e
- (d) $v_a < 0,25\text{m/s}$ para atividades leves ou sedentárias durante o verão, se a $t_o < 26^\circ\text{C}$ (ISO 7730; ASHRAE 55). Acima disso, a velocidade do ar deve ser inferior a 0,8 m/s.

Os resultados para os estudos exploratórios são mostrados na Tabela 1.

Com base nos cenários propostos, foi recomendado que o ar condicionado funcionasse com TBS = 26°C; UR = 65% e $v_a=0,1\text{m/s}$, o que atenderia a ISO 7730 e as referências nacionais, mas que resultaria em temperaturas mais altas se comparadas às usualmente adotadas na prática brasileira. Foram então realizadas simulações exploratórias para se determinar a redução nas cargas térmicas e conseqüente impacto no consumo de energia em função do ar condicionado. As simulações finais para cargas térmicas anuais, no entanto, foram realizadas considerando-se condições internas de 24°C e 50% UR, conforme determinação da equipe de engenharia, e a carga térmica para o dimensionamento do sistema foi calculada considerando-se os ambientes internos a 22°C e 50% UR.

v_a	UR	TBS
0,1m/s	50%	26,4 °C
	65%	26,0 °C
0,2m/s	50%	27,0 °C
	65%	26,6 °C
0,5m/s	50%	27,8 °C
	65%	27,5 °C
0,8m/s	50%	28,3 °C
	65%	27,9 °C

Tabela 1 - Combinação de UR e TBS para PPD ≤ 10%, considerando-se $M=70\text{ W/m}^2$, $I_{clo}= 0,5\text{ clo}$, $t_o = \text{TBS}$

Parâmetros de desempenho térmico para ambientes naturalmente ventilados

Para edifícios naturalmente ventilados, foi utilizado o modelo proposto no ASHRAE RP-884, que estabelece que a t_n está relacionada à temperatura externa a partir da Temperatura Efetiva Externa Média (meET*), de acordo com a equação (1):

$$t_n = 18,9 + 0,255 \cdot \text{meET}^* \quad (1)$$

A ET^* é calculada a partir de uma adaptação do método proposto por Szokolay (2001). Assumindo-se valores de $t_o = t_{bs}$, a ET^* é calculada para cada hora do banco de dados climáticos anual. Na sequência, t_n é calculada usando a ET^* média para as últimas 720 horas (30 dias). A tabela 2 mostra as faixas de conforto para $\text{PPD} \leq 10\%$, com variações de temperatura entre ($t_c - 2,5^\circ\text{C}$) e ($t_c + 2,5^\circ\text{C}$), (Figura 4).

Para ambientes naturalmente ventilados, os valores de TBS, UR e TRM (temperatura radiante média) são utilizados para se calcular a Temperatura Efetiva para cada hora, que é então comparada à temperatura de conforto e então classificada como “Confortável”, “Quente” ou “Fria”. Já os ambientes com ar condicionado foram avaliados com base nas suas cargas térmicas anuais e máximas.

Calculando-se ET^* a partir de TBS e UR para cada hora da base climática e comparando-se com a temperatura da zona de conforto, observa-se que 50% do tempo de ocupação apresenta condições de conforto térmico (Tabela 2).

Ou seja, em uma situação hipotética, em que as condições internas fossem equivalentes aos valores calculados da ET^* , obter-se-ia conforto em 50% do tempo de ocupação, o que passou a ser referência para o desempenho de ambientes naturalmente ventilados.

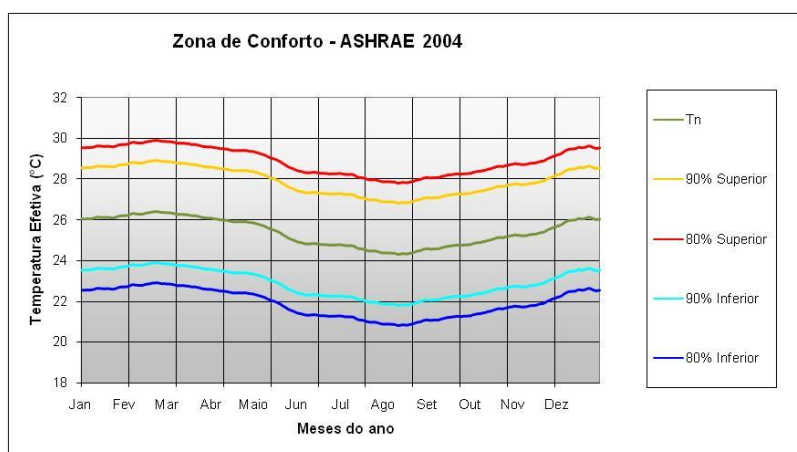


Figura 4 - Zona de conforto térmico para 90% e 80% de pessoas satisfeitas

Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	0.2%	31.5%	68.2%
Fevereiro	0.0%	23.9%	76.1%
Março	0.5%	35.7%	63.8%
Abril	0.5%	35.7%	63.8%
Maio	2.6%	44.6%	52.8%
Junho	22.1%	71.5%	6.5%
Julho	23.6%	69.5%	6.9%
Agosto	41.9%	56.3%	1.7%
Setembro	20.5%	69.2%	10.3%
Outubro	5.2%	71.7%	23.1%
Novembro	4.6%	46.7%	48.7%
Dezembro	0.2%	39.5%	60.3%
Ano	12.4%	52.5%	35.0%

Tabela 2 - Aplicação do índice de conforto a um ambiente com t_o e UR iguais ao ar externo: frequência de ocorrência das horas em conforto entre 6h e 18h

Parâmetros de desempenho para a estratégia de modo misto de condicionamento

A experiência europeia em projetos recentes indica que ambientes internos com um mínimo de 30% do período de ocupação em conforto sem a necessidade de condicionamento artificial poderiam ser operados em modo misto de condicionamento³.

A abordagem contemporânea do modo misto é nova no Brasil. Ainda hoje a maior parte dos edifícios condicionados artificialmente é de caixas seladas, com pisos elevados e forros isolados. A opção pelo ar condicionado central, combinada com a operação automatizada das janelas para viabilizar a ventilação natural em certos períodos do ano não é considerada na arquitetura comercial, por razões técnicas e econômicas.

Ainda assim, acredita-se que o modo misto traz vantagens econômicas e ambientais, ao reduzir o período de condicionamento artificial e permitir variações aceitáveis das condições ambientais internas, dentro dos limites da zona de conforto. Isso também aumenta a interação do usuário com o ambiente exterior, o que se provou ter efeitos psicológicos benéficos (HOPPE, 2002). Além disso, o modo misto resulta em reduções das cargas térmicas ao longo dos períodos de condicionamento artificial, já que a ventilação natural evita o acúmulo de calor, especialmente durante a noite. Por essa razão, a ventilação noturna foi recomendada mesmo em ambientes totalmente condicionados artificialmente durante o período de ocupação.

Nesse projeto, nos edifícios com ar condicionado, o modo misto foi descartado de início somente nos Laboratórios, no auditório do Centro de Convenções e no Centro de Realidade Virtual, que necessitavam de um controle mais restrito. Nos demais, a estratégia consistia na abertura de janelas a partir de uma TBS interna de 20°C, permitindo um aumento gradual da taxa de ventilação natural a partir desse valor. Quando a TBS excedia 26°C, todas as janelas eram fechadas e o sistema de ar condicionado era acionado, mantendo-se a temperatura de 26°C ou reduzindo-a para 24°C (de acordo com o critério de conforto estabelecido para cada ocupação). Já que velocidades do ar internas superiores a 0,8 m/s podem causar desconforto nos ambientes de trabalho, as janelas eram fechadas quando a velocidade do vento externo era superior a 5,0 m/s, que correspondia a um limite para velocidades internas aceitáveis.

³ Este valor é baseado em avaliações de custo-benefício para a condição europeia, já que ainda não há análises para climas tropicais ou para a realidade brasileira.

Procedimentos de simulação e método de avaliação

A determinação do desempenho térmico dos edifícios, incluindo o potencial de ventilação natural e a carga térmica nos períodos condicionados artificialmente, foi feita a partir de simulações computacionais de termodinâmica no TAS. Esse programa foi validado pela Secretaria de Estado do Reino Unido como modelo para o cálculo do desempenho energético segundo a regulamentação 17A do “*Building Regulations 2000*” (UK, 2000). Além disso, o TAS tem sido uma importante ferramenta de estudos de desempenho ambiental de edifícios em instituições de ensino e pesquisa na Europa e utilizado para alguns dos principais projetos de arquitetura aclamados como sustentáveis desde o início da década de 1990, como a sede do *Commerzbank* em Frankfurt, o edifício da *Swiss Re* em Londres e a Assembleia Nacional do País de Gales (GONÇALVES, 2003).

O programa utiliza o método dos “Fatores de Resposta Térmica” para o cálculo das trocas térmicas transientes no edifício, ou seja, a resposta do cálculo horário de cada “nó” ou ponto da rede é considerada para o cálculo dos demais e para o cálculo do momento seguinte. Para o cálculo da ventilação natural, o TAS cria uma “rede de nós” entre as aberturas do modelo e simula todas as zonas a serem analisadas simultaneamente, através de um balanço de energia e massa.

A combinação dos dados climáticos com os coeficientes de pressão fornecidos pelo programa permite o cálculo da variação na pressão exercida pelo vento em todas as aberturas externas e, portanto, as taxas de ventilação por ação dos ventos e suas direções são calculados para cada hora. O efeito chaminé também é integrado à análise. É possível, ainda, simular a interação entre ventilação natural e mecânica.

Para a modelagem geométrica, o TAS possibilita o dimensionamento e o posicionamento detalhado de cada abertura, bem como o controle de operação das mesmas com diferentes funcionamentos ao longo do dia, variando de acordo com as condições climáticas externas e/ou internas. Além disso, permite a simulação em modo misto de condicionamento, realizando a interação entre os modos artificial e natural conforme a mesma gama de controles de operação.

Antes da adoção definitiva do TAS, foram realizados estudos comparativos com os programas *Energy Plus* e *Ecotect*. A escolha final se deu em função de três razões:

(a) o modelo utilizado no TAS mostrou-se adequado para a representação dos fenômenos, apesar de simplificações no cálculo de fator de forma que podem ser contornadas durante a modelagem;

(b) apesar da reconhecida capacidade do *Energy Plus* no tratamento de ambientes condicionados artificialmente (CRAWLEY, 2008), o TAS apresenta ferramentas mais adequadas na especificação do modo misto, na distribuição e no controle das aberturas; e

(c) a equipe de consultoria já contava com membros treinados na utilização do programa e a interface amigável permitiu uma rápida alteração das variáveis de projeto, facilitando a interação com a equipe de arquitetura.

A modelagem foi realizada em dois estágios: características geométricas, e ocupação e materiais. A geometria é informada através de uma interface gráfica de duas dimensões que permite visualizações tridimensionais. A maior parte das decisões em relação à estratégia de simulação deve ser tomada nesse momento, incluindo localização dos elementos construtivos, localização e tipos de aberturas, zoneamento térmico para atribuição de ocupação e tomada de resultados, além das simplificações geométricas a serem adotadas. As diretrizes de modelagem foram:

(a) simplificação da geometria, observando equivalência de cargas térmicas;

(b) elementos construtivos foram determinados considerando-se o tipo de componente e o funcionamento do elemento;

(c) agrupamento de ambientes com características térmicas e de ocupação em uma mesma zona ou grupo de zonas;

(d) ambientes críticos e adjacências foram zoneados separadamente e modelados de maneira mais detalhada;

(e) ambientes condicionados naturalmente, artificialmente ou de maneira mista foram separados em zonas específicas; e

(f) devido a limitações no cálculo do fator de forma das paredes, buscou-se dividir os ambientes em áreas com razão de aspecto próxima de 1.

A ocupação e os materiais são informados em um segundo estágio, através de uma interface do tipo “drag & drop”. A informação necessária inclui:

(a) arquivo climático, conforme o capítulo Considerações metodológicas ;

(b) calendário e horário para ocupação, atividades e controles. O calendário afeta todo o edifício,

enquanto os horários são atribuídos para cada ambiente e/ou atividade;

(c) componentes, proteções solares e esquemas de abertura são atribuídos a cada elemento construtivo definido na fase de modelagem; e

(d) cargas internas e parâmetros de funcionamento do ar condicionado são atribuídos a cada zona ou grupo de zonas. A temperatura do termostato variou ao longo do processo de simulação, de acordo com as recomendações da Petrobras e do projeto dos sistemas prediais.

As simulações térmicas foram complementadas por simulações de ventilação realizadas em um programa de dinâmica de fluidos, o CFX 5.7. A parametrização é complexa, com poucas variáveis assumidas *a priori*, sendo responsabilidade do usuário a modelagem adequada da situação desejada.

O modelo pode ser confeccionado em qualquer aplicativo CAD e deve conter todos os objetos de interesse e o entorno, além de um volume estanque para representar o domínio fluido. O espaço fluido dentro do domínio é discretizado através de uma malha, definindo-se os pontos e volumes para os quais as equações fundamentais serão resolvidas.

As simulações foram realizadas em duas etapas. Na primeira, foi estudado o conjunto de edifícios, verificando-se o fluxo nos espaços abertos, as interferências entre os edifícios e a distribuição dos coeficientes de pressão. Na segunda, foram estudados ambientes específicos, com o objetivo de se verificar o campo de vento interno, informar coeficientes de troca por convecção e testar desenhos de aberturas para ventilação. Nesse caso, as temperaturas das superfícies internas foram extraídas dos resultados de simulação termodinâmica e informadas ao modelo, juntamente com os coeficientes de pressão para cada abertura.

A combinação de resultados entre as simulações de maneira interativa permitiu a avaliação comparativa do desempenho térmico e da eficiência energética das diferentes soluções de acordo com os seguintes critérios:

(a) os períodos de conforto obtidos na operação sem condicionamento artificial foram determinados de acordo com o modelo adaptativo previsto no ASHRAE RP-884 (2004), considerando-se um PPD de 10% e 20%. A percentagem de horas em conforto, assim como horas em desconforto por calor ou frio, foi calculada para cada zona durante o período de ocupação;

(b) a carga térmica máxima foi determinada pela maior carga térmica obtida no dia de referência de verão para informar o projeto do sistema de ar condicionado. São consideradas apenas as cargas internas, desconsiderando-se as cargas na serpentina devidas à renovação de ar. Deve-se observar que TBS e TBU do dia de referência são compatíveis com as normas brasileiras de ar-condicionado e que os valores nos quais as cargas térmicas na simulação anual excedem aqueles nas simulações do dia de referência nunca são maiores do que 5% do período de ocupação. Desse modo, as recomendações para dimensionamento do ar condicionado seguem as recomendações do dia de referência de verão adotado;

(c) um perfil anual de cargas foi desenhado a partir do cálculo da frequência de ocorrência (por intervalos e acumulada) das cargas térmicas ao longo do ano; e

(d) o perfil de ganhos e perdas para os ambientes selecionados é apresentado também para o dia de referência de verão.

Os resultados para cada opção projetual eram comparados, permitindo a escolha daquela que se apresentasse mais adequada.

Parâmetros de projeto para o sistema de ar condicionado

Laboratórios

No ar-condicionado dos Laboratórios, incluindo os gabinetes adjacentes às salas especiais, a TBS de 22°C (+/- 1 °C) foi adotada como critério de projeto, sem o controle de UR, com 100% de tomada de ar externo, devido às exigências do uso. Nesse caso, observa-se uma discrepância entre os parâmetros testados nas avaliações de conforto e energia e o projeto do ar condicionado, tendo em vista que os usuários dos laboratórios usarão roupas pesadas. Por outro lado, a eliminação do controle de umidade terá impacto positivo no consumo de energia do sistema.

Prédio Central

No Prédio Central, a climatização dos escritórios foi prevista com insuflamento pelo piso, favorecido pela planta estreita e pelas fachadas e coberturas sombreadas e isoladas.

A temperatura de projeto foi definida em 24°C (+/- 1°C), sem o controle direto de umidade. Identificou-se a temperatura de 14°C para o insuflamento de ar como adequada para remover a umidade necessária para obtenção das condições de conforto, entre 50% e 55% UR. Quanto às

tomadas de ar, o sistema de ar-condicionado prevê 30% de ar fresco conectado a um controle de monitoramento de CO₂.

Para a circulação central, que dá acesso aos escritórios, foi projetado um sistema de insuflamento de ar a 20°C, atingindo a altura dos usuários, sem controle específico das condições térmicas, resultando em uma zona de transição entre o ambiente externo e os espaços internos condicionados artificialmente.

Estudo paramétrico preliminar

Um estudo exploratório foi realizado para se avaliar o potencial para edifícios naturalmente ventilados e as mudanças no desempenho energético causadas por diferentes condições de operação do sistema de ar condicionado. Para isso, um dos gabinetes (escritórios) existente no edifício de Laboratórios foi simulado. Optou-se por esse ambiente por se tratar de um espaço representativo do complexo, repetido ao longo das fileiras de laboratórios e que permitia a utilização da ventilação natural (Figuras 5 e 6).

O modelo simulado incluía três laboratórios, cada um definido por dois escritórios e uma sala de pesquisa. É um escritório típico, projetado para duas pessoas, com possibilidade de controle pelo usuário dos parâmetros de condicionamento e da abertura das janelas.

O ambiente conta com uma única interface com o exterior, protegida da radiação solar direta pela circulação externa e por um pavimento técnico superior. Externamente é pintado de branco, seguindo especificações de cor e componentes iguais às aplicadas em outros edifícios do complexo.

Foram avaliadas as orientações norte e sul, com ocupação de 7h às 17h, excluindo finais de semana, de acordo com os horários de trabalho da Petrobras.

Simulações para avaliação do potencial de ventilação natural

Os resultados iniciais indicaram um potencial para ventilação natural de 13% a 30% do período de ocupação. Nos meses mais frios a abertura de 50% da área de vão levaria ao conforto durante 50% do tempo. Sendo assim, o modo misto provou-se uma opção válida, especialmente com baixas cargas internas.

Simulação para avaliação dos parâmetros de condicionamento de ar

Buscando-se avaliar o potencial para economia de energia em função da operação do sistema de ar condicionado, quatro cenários foram propostos, combinando: 24°C com 50% e 60% UR e 26°C com 60% e 65% UR, de 7h às 17h).

Com base nos resultados (Figura 7) foi recomendado que o sistema operasse a 26°C e

65% UR, o que significaria uma redução de 15% na carga máxima de resfriamento e 30% na carga máxima de desumidificação, se comparado com o cenário de 24°C e 50% UR. Dada a representatividade dos espaços de trabalho no complexo, essas ações resultariam em uma redução no dimensionamento do sistema, com vantagens ambientais, espaciais e econômicas.



Figura 5 - Modelo de uma fileira de laboratórios, com o primeiro caso de simulação: orientação norte

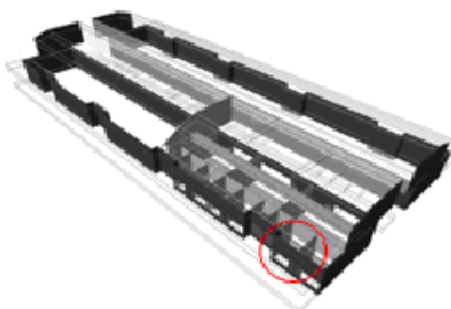


Figura 6 - Modelo de uma fileira de laboratórios, com o primeiro caso de simulação: fechamento lateral oeste

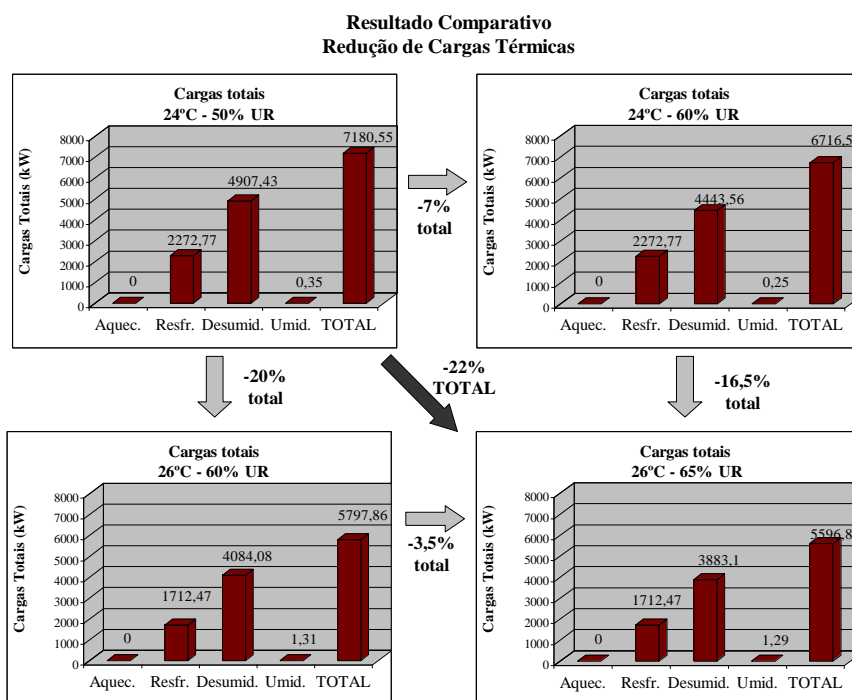


Figura 7 - Resultados de carga térmica para os quatro cenários de operação do ar condicionado

Avaliação de desempenho térmico de ambientes de escritórios

Gabinetes do edifício de Laboratórios

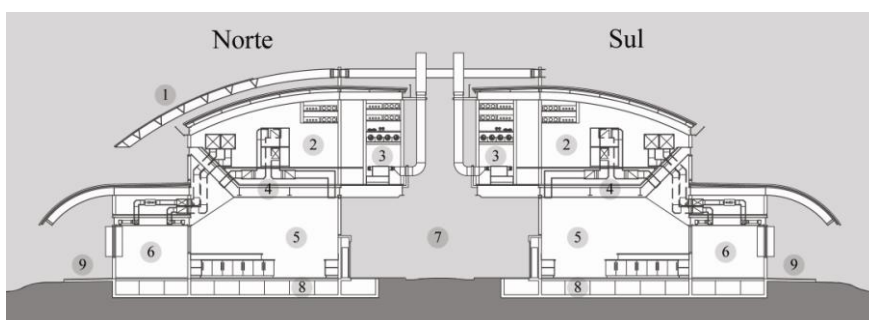
Conforme descrito em Estudo paramétrico preliminar, dois gabinetes localizados nas extremidades de uma das fileiras de laboratórios, com orientações norte e sul, foram simulados (Figuras 8 e 9).

1º cenário de simulação: análise do potencial da ventilação natural

De início, simulações foram realizadas para quantificar o potencial de ventilação natural nos gabinetes. Com base nos resultados, mais isolamento térmico foi previsto, conforme solução construtiva acordada com a equipe de arquitetura, especialmente para as paredes internas que separam os escritórios das salas especiais que,

devido a requisitos de uso, foram consideradas artificialmente condicionadas a temperaturas mais baixas do que os escritórios adjacentes.

Os resultados das simulações de ventilação natural apontaram a possibilidade de 88% do total de horas ocupadas no ano dentro da zona de conforto, justificando a introdução do modo-misto. Na sala norte, a porcentagem de horas ocupadas em conforto é de 55,3%, sendo 37,9% das horas referentes à condição classificada como quente e 6,8%, como frio. Já com relação à sala sul, 88,6% das horas ocupadas do ano estão em conforto, enquanto que 6,5% são classificadas como quente e 4,9% como frio. O melhor desempenho das salas orientadas para sul, em comparação à norte, deve-se à menor exposição à radiação solar direta, e também à maior exposição das aberturas aos ventos. Outros aspectos positivos foram as cargas internas moderadas e as dimensões reduzidas do ambiente. Ao final, recomendou-se aumentar a massa térmica, no intuito de expandir ainda mais as horas em conforto.



Legenda:

- 1 Cobertura externa com painéis fotovoltaicos;
- 2 Pavimento técnico;
- 3 Pipe-rack;
- 4 Teto técnico;
- 5 Sala de laboratório;
- 6 Gabinete dos pesquisadores;
- 7 Rua interna de serviços;
- 8 Piso técnico;
- 9 Circulação externa aberta.

Figura 8 - Laboratórios: seção transversal indicando os ambientes internos

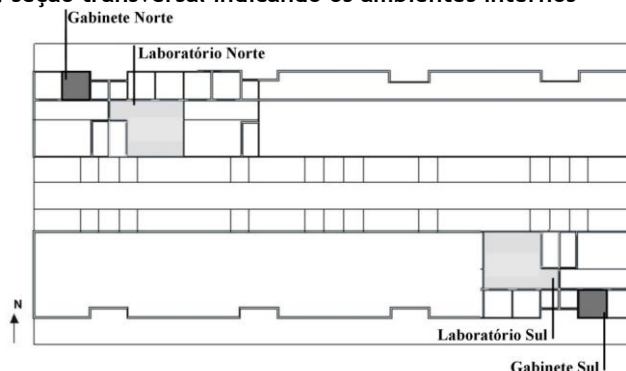


Figura 9 - Localização dos laboratórios e respectivos gabinetes selecionados para a avaliação de desempenho térmico

2º cenário de simulação: análise do modo-misto *versus* ar condicionado em tempo integral

Essa etapa visa à eficiência energética comparando o modo-misto com a operação integral de ar-condicionado nos gabinetes. O vão da abertura para ventilação natural correspondeu a 50% da área total da janela. Sob condições climáticas externas desfavoráveis, as janelas seriam fechadas e o ambiente seria controlado pelo sistema de ar-condicionado a 26°C e 65%UR. Nessa etapa, o desempenho do vidro laminado incolor com camada de ar 10+28+6 mm em comparação ao vidro laminado incolor 6mm foi testado nas janelas externas.

A introdução do modo-misto causou uma redução de aproximadamente 10% das cargas totais anuais de ambas as salas, em comparação ao modelo com ar-condicionado integral. Com relação às cargas máximas para o sistema de ar condicionado, foi encontrada uma redução de 30% para o gabinete norte e de aproximadamente 50% para o gabinete sul. Com base nesses resultados, o modo-misto foi fortemente recomendado. Seguramente, os resultados seriam melhores se mais massa térmica fosse incorporada.

Por outro lado, os efeitos positivos da 2ª camada de vidro durante os períodos de climatização artificial foram irrelevantes, como ilustra a Tabela 3, devido aos períodos mais longos de ventilação natural.

3º cenário de simulação: análise do modo-misto, fase II

Nessa fase algumas alterações foram propostas pela arquitetura, nas quais as paredes externas e as divisórias seriam substituídas por componentes de menor isolamento térmico.

Durante os períodos de ventilação natural o vão de abertura correspondeu a 80% da área da janela. Para as horas de ar-condicionado, dois cenários foram comparados em uma base anual: o primeiro com 26°C e 65% UR e o segundo com 24°C e 50% UR. Para o período crítico de verão, dois outros cenários foram testados, com 24°C e 50% UR, e outro com 22°C e 50% UR. Os parâmetros mais baixos de operação do ar-condicionado estudados foram definidos no projeto dos sistemas: 22°C e 24°C, 50%UR. Estes foram então testados contra condições térmicas mais tolerantes, de 26°C e 65% UR.

Com relação ao período de ar-condicionado, o gabinete norte apresentou um melhor desempenho do que o gabinete sul, considerando-se as cargas térmicas máximas (Tabela 5). Esse fato pode ser explicado pela falta de proteção solar na fachada sul, em oposição ao que acontece na fachada norte, protegida pelo beiral da cobertura. Porém, para ambas as salas, reduções significativas nas cargas máximas foram obtidas comparando-se os dois cenários de ar-condicionado. Nesse sentido, o aumento da temperatura de 24°C para 26°C durante o mês mais quente mostrou uma redução equivalente a 20% na carga térmica e, considerando-se o restante do ano, este valor sobre para 35%.

	Carga total anual (KW) (ar condicionado - a/c)			Carga máxima (W)		
	a/c integral vidro laminado 6 mm	modo-misto vidro laminado 6 mm	modo-misto vidro laminado com camada de ar 10+28+6mm	a/c integral vidro laminado 6 mm	modo- misto vidro laminado 6 mm	modo-misto vidro laminado com camada de ar 10+28+6mm
Gabinete/ Sala						
Norte	2,7	2,4	2,4	2.281	1.604	1.620
Sul	1,2	1,1	1,1	1.383	772	722

Tabela 3 - Carga térmica total anual e carga térmica máxima dos gabinetes de escritórios nos laboratórios: ar condicionado 26°C-65% UR

Gabinete/ Sala	Carga máxima (kW)				Carga total (MW)	
	Fevereiro		Anual		Anual	
	22°C/ 50%	24°C/ 50%	24°C/ 50%	26°C/ 65%	24°C/ 50%	26°C/ 65%
Norte	1,48	1,21	1,82	1,12	2,2	1,1
Sul	1,57	1,29	1,87	1,26	2,2	1,2

Tabela 4 - Carga térmica total anual e carga térmica máxima dos gabinetes de escritórios nos laboratórios: avaliação do modo-misto

Gabinete/ Sala	Carga máxima (kW)		Carga total (MWh)
	Fevereiro	Anual	Anual
	22°C / 50%	24°C / 50%	24°C / 50%
Norte	2,29	1,76	2,3
Sul	2,45	1,91	2,3

Tabela 5 - Carga térmica total anual e carga térmica máxima dos gabinetes de escritórios nos laboratórios: simulações finais

Ala/ pavimento	Frio (%)	Calor (%)	Conforto (%)
Ala oeste (1º pavimento)	2,2	59,3	38,5
Ala leste (2º pavimento)	1,3	62,2	36,5

Tabela 6 - Escritórios do Prédio Central: porcentagem das horas de ocupação do ano em conforto

A análise das cargas térmicas totais anuais evidenciou uma redução de 42% com a alteração dos parâmetros de temperatura (cargas sensíveis), enquanto que o aumento de UR de 50% para 65% (cargas latentes) proporcionou cargas totais anuais 42% menores. Paralelamente, o período potencial de ventilação natural com o modo-misto, considerando-se as horas ocupadas, foi identificado entre maio e setembro, mantendo-se os parâmetros do ar-condicionado a 24°C e 50% UR. A operação do sistema a 26°C e 65% UR provou expandir o período de ventilação natural em um mês, equivalente a uma redução de 10% nas horas de ar-condicionado.

As janelas foram consideradas totalmente abertas para ventilação noturna das 17h às 7h e, portanto, entende-se que o real período de ventilação natural deverá ser maior do que o indicado nas simulações.

Em função disso, considerando-se 24°C e 50% UR a porcentagem anual de ventilação natural durante as horas ocupadas do gabinete norte é de 12,2%, sendo similar ao gabinete sul, com 13,3%. Alterando-se os parâmetros de operação para 26°C e 65% UR, a porcentagem anual de ventilação natural aumenta para 21,2%, a norte, e 23,1%, a sul.

Simulações finais

As paredes externas dos gabinetes foram substituídas, mais uma vez, por painéis de concreto pré-moldado de 12cm de espessura, com revestimento. As paredes internas, por sua vez, foram especificadas com sistema *dry wall*. Essa alteração não foi formulada com base nos resultados prévios das análises de desempenho, mas sim, em questões construtivas estabelecidas pelo projeto de arquitetura.

Outra mudança foi a redução do vão efetivo das aberturas para a ventilação natural para 50%, ao invés dos anteriores 80%, baseado no projeto das esquadrias. No período de climatização artificial, a

avaliação final considerou as condições de 24°C e 50% UR. Os parâmetros do termostato foram avaliados, também, para as cargas máximas durante o mês mais quente, incluindo um segundo cenário de 22°C e 50% UR, segundo o projeto dos sistemas prediais.

Como resultado, encontrou-se um aumento nas cargas térmicas durante os períodos de ar-condicionado nos gabinetes, em comparação à configuração anterior. As cargas máximas foram mais elevadas no gabinete sul, como consequência da radiação solar incidente, evidenciando a necessidade de proteção solar. É possível observar na Tabela 6 que as cargas máximas no mês mais quente foram significativamente mais altas em ambos os casos, em até 50%, quando comparadas aos resultados anteriores. Paralelamente, as cargas totais anuais aumentaram 5%, o equivalente a 1 MWh para cada gabinete.

Considerando-se os períodos de ventilação natural e o modo-misto, as mudanças nos materiais trouxeram um aumento de aproximadamente 15% no período potencial de ventilação natural, entre maio e outubro, em ambos os gabinetes, com o ar-condicionado a 24°C e 50% UR. Ressalta-se o efeito compensatório de tal aumento em relação à elevação nas cargas térmicas para os períodos de ar-condicionado, conforme Tabela 5.

Escritórios do Prédio Central

O Prédio Central tem 245m de comprimento e três pavimentos, orientado a leste e oeste, elevado sobre pilotis, sendo o primeiro andar de piso técnico e os outros dois de escritórios, compostos por duas alas paralelas conectadas por um corredor de circulação interna aberta, para o qual são voltadas áreas envidraçadas nos fechamentos verticais.

Enquanto a ala leste é formada por um bloco de dois pavimentos, a ala oeste possui apenas um, com terraços na cobertura de cada bloco. Uma grande cobertura protege todo o edifício,

sombreando os terraços e os escritórios. Esse edifício atravessa o complexo na direção norte-sul, conectando o Centro de Convenções, os Laboratórios e o grande Restaurante no nível térreo (Figura 10).

A cobertura que protege todo o edifício é um dos aspectos fundamentais do partido arquitetônico e da concepção ambiental, na medida em que cria condições de ocupação nos terraços e sombreia a laje dos escritórios (Tabela 7). Inicialmente, a cobertura era constituída por chapas metálicas perfuradas, permeáveis à radiação solar e à ventilação.

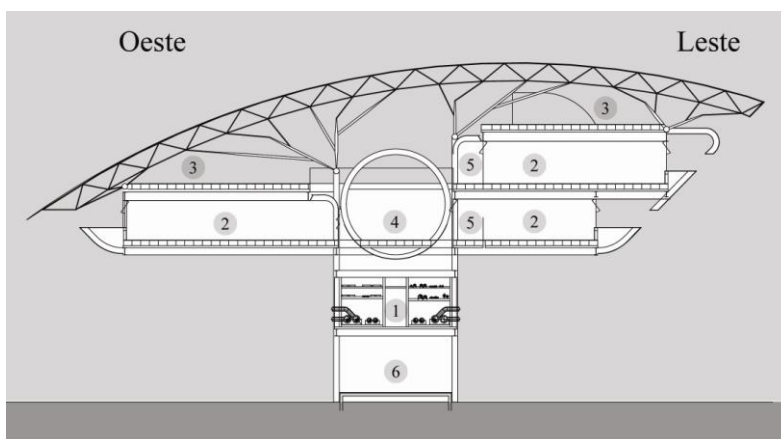
1º cenário simulado: análise do potencial de ventilação natural

As simulações foram realizadas para dois escritórios, localizados em diferentes pavimentos e orientações, com 665 m² de área útil cada e pé-

direito de 2,80 m. Na primeira etapa, esses ambientes eram caracterizados por materiais leves e isolantes, com acabamento externo metálico branco e janelas de vidro laminado incolor 6 mm.

Na primeira simulação foi considerado um vão efetivo para a ventilação de 50% das aberturas, durante as horas de trabalho, e 100% durante as horas não ocupadas, das 17h às 7h. Nos finais de semana e feriados, as janelas foram consideradas totalmente abertas (Figura 11).

Nessa primeira etapa a cobertura original foi comparada com uma solução composta por painéis-sanduíche metálicos e duas faixas longitudinais com vidro laminado incolor 6mm, sobre a circulação central, para proteger os terraços de chuva e, ainda, permitir a penetração controlada da radiação solar.



Legenda:

- 1 Pipe-rack;
- 2 Escritórios;
- 3 Terraços;
- 4 Circulação central;
- 5 Circulação interna;
- 6 Circulação do térreo.

Figura 10 - Prédio Central: seção transversal mostrando a composição dos espaços internos

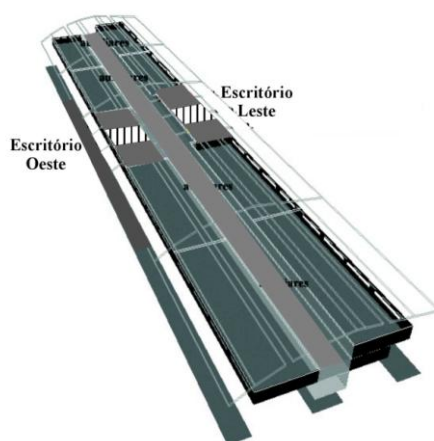


Figura 11 - Modelo esquemático dos ambientes de trabalho do Edifício Central, incluindo os ambientes selecionados para a avaliação de desempenho térmico

As simulações de ventilação natural nos escritórios, com PPD de 20%, resultaram em 38,5% das horas em conforto no ano no escritório do 1º pavimento, a oeste, e 36,5% no escritório do 2º pavimento, a leste – o que enfatiza a importância de aberturas operáveis (Tabela 6). Outro resultado relevante foi a melhoria do desempenho térmico considerando-se a grande cobertura de painéis sanduíche, 20% maior do que os resultados obtidos com a solução de chapas metálicas perfuradas.

Mesmo assim, os resultados positivos no conforto térmico dos escritórios devem ser avaliados face ao impacto dessa solução na diversidade das condições ambientais dos terraços. A cobertura também foi avaliada conforme critérios de conforto em espaços externos e desempenho luminoso.

Nessas simulações, as janelas foram consideradas abertas durante todo o tempo e, por esse motivo, as horas de frio poderiam se tornar horas de conforto simplesmente com o controle da ventilação, resultando em um potencial para ventilação natural por 40% do ano. Por fim, ocorreu um ganho significativo de cargas térmicas através da superfície de vidro das fachadas internas das alas de escritórios que estão voltadas para a circulação central descoberta.

2º cenário de simulação: análise do modo-misto versus ar condicionado por período integral

Partindo das análises de ventilação natural nos ambientes de trabalho, foi testado o potencial do modo-misto.

Seguindo os mesmos parâmetros utilizados nas simulações dos gabinetes dos Laboratórios, testou-se o vidro laminado incolor com camada de ar 10+28+6 mm contra o vidro laminado incolor 6 mm. Devido a questões acústicas as janelas localizadas na fachada oeste da ala oeste do edifício foram consideradas fixas e, sendo assim, a incorporação de ventilação natural nesses escritórios seria possível apenas por meio das janelas voltadas para a circulação central, o que limita bastante os seus efeitos.

Conforme o projeto arquitetônico foi sendo desenvolvido, alterações na cobertura foram propostas e testadas (Tabela 8). Uma composição das duas opções anteriores, formada por uma área central de telha-sanduíche e faixas laterais de telhas metálicas perfuradas foi avaliada, com base

no seu desempenho térmico e luminoso. O beiral da cobertura a oeste manteve-se parcialmente permeável à radiação solar e, desse modo, à luz natural, como um *brise soleil* linear contínuo, composto por aletas.

A solução da cobertura teve um impacto positivo no corte dos ganhos solares dos escritórios. Já a opção por janelas com vidro laminado com camada de ar 10+28+6 mm não mostrou benefícios significativos para o conforto térmico.

Com relação à eficiência energética, o modo-misto comprovadamente contribuiu para a redução das cargas térmicas dos escritórios, conforme Tabela 8. Por outro lado, as cargas totais anuais sofreram um acréscimo de 1% no escritório leste e 5% no escritório oeste (que possui janelas externas fixas e, conseqüentemente, menores taxas de ventilação). Nesse caso, os resultados para o escritório oeste sofreram maior influência da radiação solar, devido à permeabilidade dos dispositivos de proteção.

Concluindo, pode-se dizer que o projeto arquitetônico e os parâmetros de operação exerceram impacto significativo no modo-misto, tais como a redução da área envidraçada voltada para a circulação central, onde foram identificados os ganhos solares mais relevantes. Enquanto a ala leste mostrou potencial para o modo-misto, a ala oeste mostrou o oposto, para a qual o ar-condicionado durante todo o tempo de ocupação é a solução mais adequada. Particularmente nesse caso, as janelas de vidro laminado com camada de ar 10+28+6 mm foram recomendadas para ambas as fachadas da ala oeste, com a finalidade de aumentar a eficiência energética do sistema de ar-condicionado.

3º cenário de simulação: análise do modo-misto versus ar condicionado, fase II

Partindo dos resultados anteriores, o escritório oeste foi considerado com ar-condicionado por todo o tempo de ocupação. Para esse caso, o uso de vidro laminado com camada de ar 10+28+6 mm foi novamente testado. Para os escritórios a leste, por sua vez, a estratégia de modo-misto continuou a ser investigada.

A aplicação de vidro laminado verde 7mm nas fachadas internas de ambos os escritórios, leste e oeste, voltadas para a circulação aberta interna, e vidro laminado incolor 7mm nas fachadas externas, foi testada e comparada à aplicação de vidro laminado incolor 7mm em todas as janelas.

Também nessa etapa foram testadas paredes externas mais leves, com revestimento externo em alumínio e isolante termoacústico na face interna, forros absorvedores acústicos e divisórias internas de piso a forro. Também foi incluída uma abertura linear na cobertura, ao longo do comprimento do edifício, para a saída do ar, a fim de evitar o acúmulo de calor.

Considerando-se a ala leste operando em modo-misto, o uso do vidro laminado verde nas janelas da fachada voltada para a circulação central, com o ar-condicionado operando a 26°C e 65% UR, resultou em uma redução de 3,8% nas cargas de resfriamento anuais totais, em oposição ao uso do vidro laminado incolor em ambas as fachadas desse bloco, conforme Tabela 10.

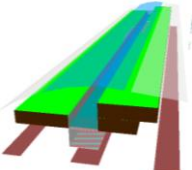
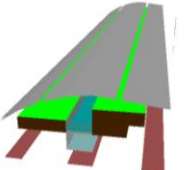
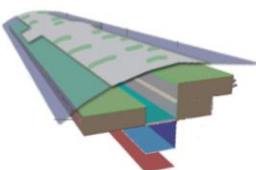
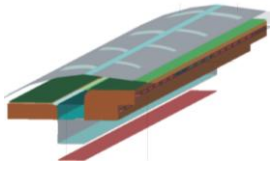
Solução original	1º etapa de simulações	2º etapa de simulações	3º etapa de simulações e simulações finais
chapa metálica perfurada	51mm painel sanduíche + 2 faixas longitudinais de vidro laminado transparente 6mm	chapa metálica perfurada (40% vazios)+ painel sanduíche e vidro verde laminado 6mm no centro	chapa metálica perfurada (40% vazios)+ painel sanduíche e vidro verde laminado 7mm + 1 shed central (30% abertura)
			

Tabela 7 - Soluções de cobertura testadas nas simulações dos escritórios do Edifício Central

Escritório/ Sala	Carga anual total (MW)		Carga máxima (W)	
	a/c integral vidro laminado 6mm	modo-misto vidro laminado 6mm	a/c integral vidro laminado 6mm	modo-misto vidro laminado 6mm
Leste	37,9	39,4	33.738	32.010
Oeste	40,3	42,1	34.703	33.962

Tabela 8 - Carga térmica anual e carga térmica máxima de resfriamento para salas de escritórios leste e oeste do Prédio Central: a/c 26°C e 65% UR

escritório/ sala	carga total anual (MWh)		
	vidro laminado incolor 7 mm	vidro laminado incolor 7mm e vidro laminado verde 7mm	
	26°C / 65%	26°C / 65%	24°C / 50%
Leste (modo-misto)	58,8	57,0	79,1
Oeste (a/c integral)	62,9	61,8	81,3

Tabela 9 - Cargas totais anuais para as salas de escritórios leste e oeste do Prédio Central, com diferentes vidros e configurações de ar condicionado

Edifício	Conforto (%)
1 Centro de Convenções	
Restaurante/ Lanchonete	69,2
Área de Eventos	59,8
2 Empreiteirópolis	
Refeitório	65,8
Cozinha quente	52,0
Vestiários	75,0
3 Oficinas	
Oficina	54,6
4 Planta-Piloto	
Abastecimento	57,0

Tabela 10 - Frequência de horas em conforto nos edifícios de tipologia galpão naturalmente ventilados, considerando-se PPD de 20%

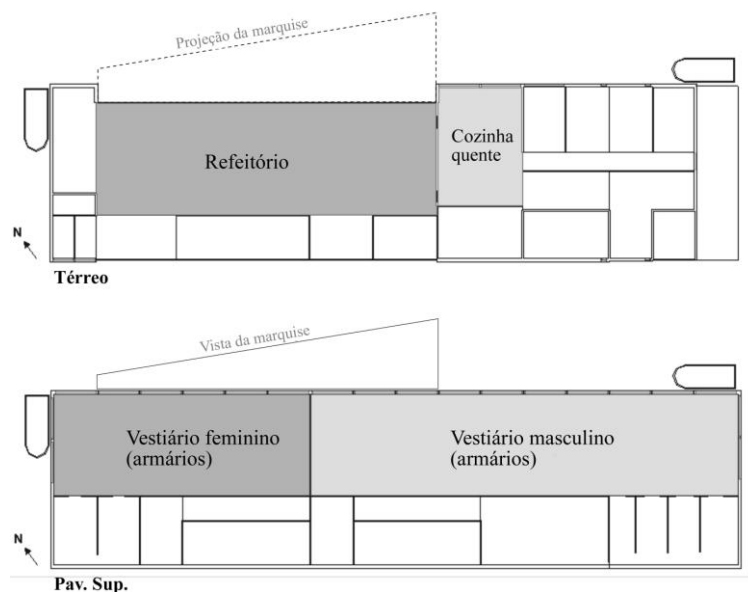


Figura 12 - Ambientes da Empreiteirópolis selecionados para a avaliação de desempenho térmico

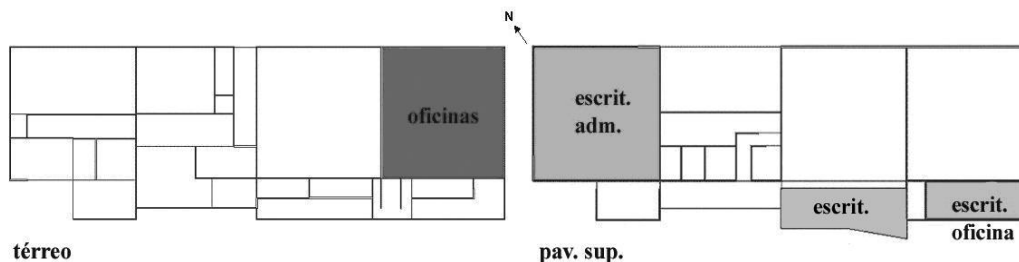


Figura 13 - Ambientes das Oficinas selecionados para a avaliação de desempenho térmico

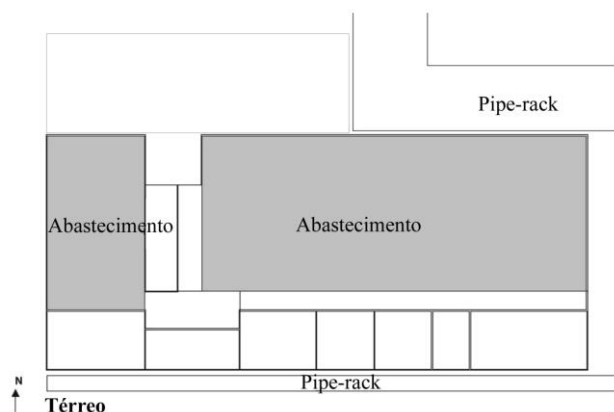


Figura 14 - Ambientes da Planta-Piloto selecionados para a avaliação de desempenho térmico

Avaliação de desempenho térmico de galpões naturalmente ventilados

As intervenções no projeto

Dos quatro galpões do complexo, com coberturas em *shed*, três contaram com a ventilação natural, combinando efeito de vento e efeito chaminé:

Empreiteirópolis, Oficinas e Planta-Piloto (Figuras 12, 13 e 14).

A princípio, a orientação original das aberturas na cobertura (voltada para a direção predominante dos ventos) foi o principal fator de influência no desempenho desfavorável da ventilação natural dos espaços internos. Por essa razão, os *sheds* foram redesenhados, reposicionando as suas aberturas para a parte superior do plano vertical, incluindo um elemento de proteção solar e

proteção contra o vento predominante, conforme Figura 15. Dessa forma, sem alterar a orientação dos mesmos, foi possível evitar os efeitos desfavoráveis dos ventos predominantes na saída de ar e, ao mesmo tempo, tirou-se proveito da pressão negativa para maximizar a exaustão do mesmo.

Mesmo assim, os resultados das primeiras simulações para os vestiários da Empreiteirópolis e para as Oficinas mostraram que a ventilação natural ainda era insuficiente.

Simulações de dinâmica de fluidos foram realizadas para os três edifícios, conforme Figura 16, que ilustra o caso da Empreiteirópolis. A partir daí foram extraídos os coeficiente de pressão para o cálculo do desempenho térmico, além de uma visualização da distribuição da ventilação no ambiente.

Nos vestiários da Empreiteirópolis, a ausência de tomadas inferiores de ar também restringiu a

ventilação, resultando em condensação superficial nas paredes e cobertura. Aberturas altas foram adicionadas nas fachadas a sotavento, aumentando assim a área de exaustão, estratégia esta também adotada nas Oficinas, onde os ganhos de calor por equipamentos são elevados e apenas o *shed* servia como saída para a ventilação natural.

A ventilação forçada nos vestiários da Empreiteirópolis também foi considerada para melhorar as condições de conforto, com insuflamento e exaustão de ar nas áreas de chuveiros (15 trocas/h) e armários (10 trocas/h). A cozinha, no térreo, também teve uma taxa de exaustão simulada em 30 trocas/h. Foi proposta então uma ventilação mecânica com essa taxa, sendo que a exaustão deve ser pontual em cada equipamento para minimizar o aquecimento do ambiente, pois a perda pela ventilação natural não é suficiente, mesmo com a abertura de 50% das janelas altas basculantes.

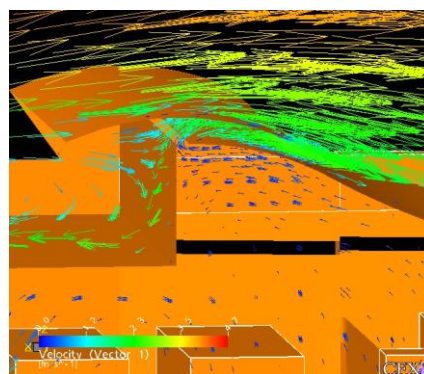
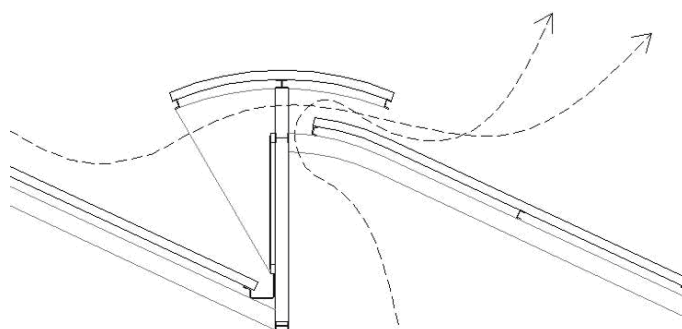


Figura 15 - Detalhe e simulação da saída de ar do *shed* com proteção para a saída do vento, comum aos edifícios do complexo que seguem a tipologia do edifício industrial

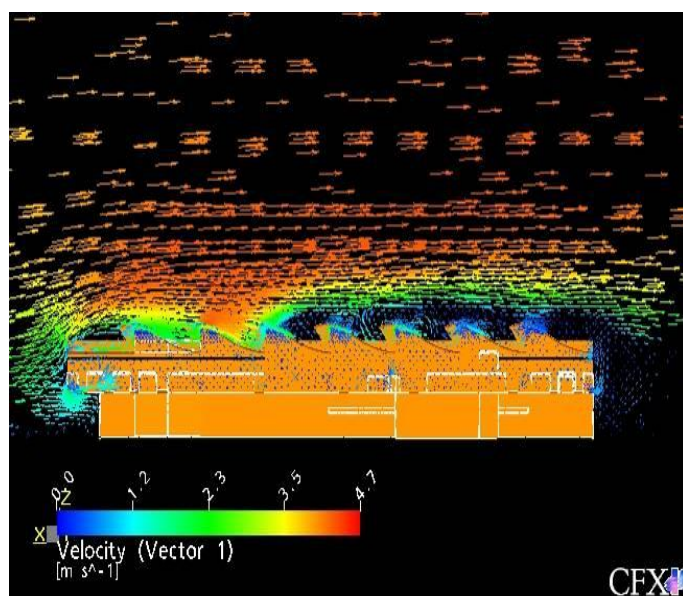


Figura 16 - Estudos de simulação da ventilação nos galpões

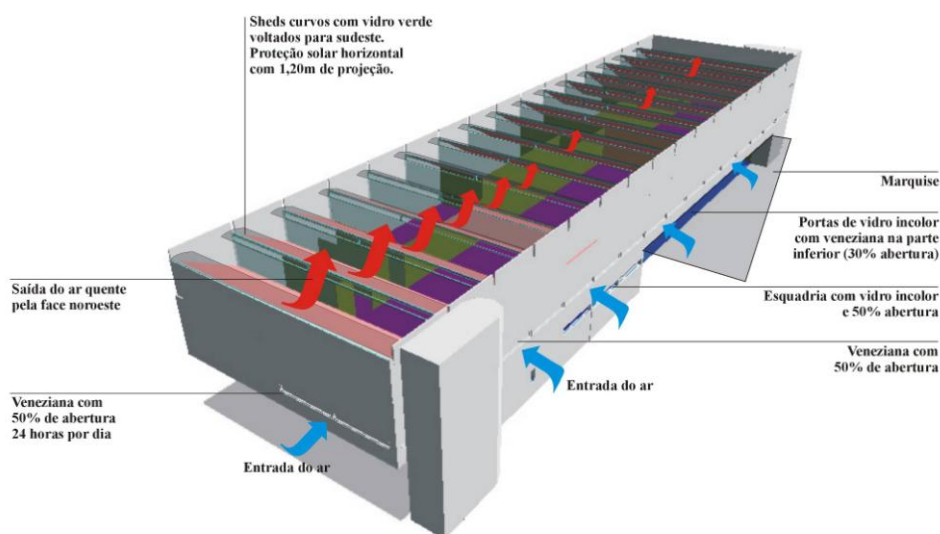


Figura 17 - Modelo esquemático da Empreiteirópolis e as estratégias para o desempenho ambiental

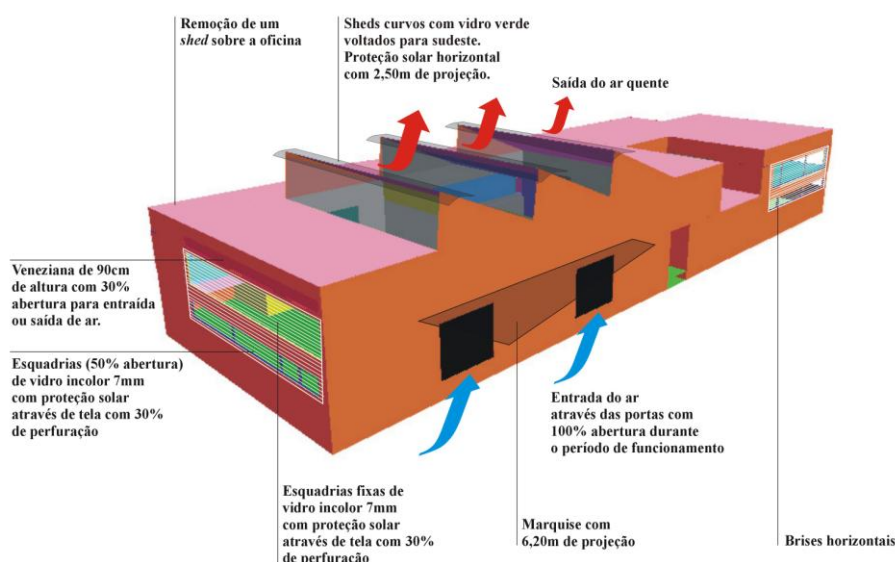


Figura 18 - Modelo esquemático das Oficinas e estratégias para o desempenho ambiental

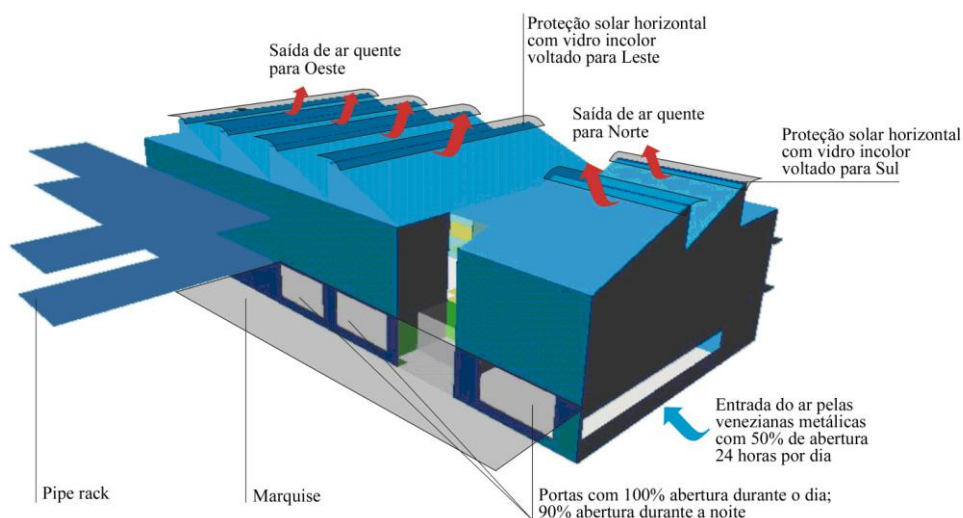


Figura 19 - Modelo esquemático da Planta-Piloto e as estratégias para o desempenho ambiental

Alterações também foram propostas para os materiais como, por exemplo, maior isolamento térmico entre a cozinha e o refeitório. Além disso, proteções solares externas foram propostas para as janelas e para as aberturas na cobertura de todos os galpões (Figuras 17, 18 e 19).

Resultados das análises de conforto térmico

Os ambientes analisados mostraram um desempenho satisfatório após as alterações propostas, com PPD de 20% (Tabela 10).

A cozinha e o refeitório da Empreiteirópolis mostraram-se dentro da zona de conforto durante 52% e 65,8% do período de ocupação anual, respectivamente. A cozinha contou com uma ventilação mecânica de 30 trocas/h, além de alterações nos materiais e incremento de aberturas para ventilação natural, para se chegar a esse resultado. Sem essas melhorias a porcentagem das horas do ano em conforto não passava de 8,5%.

Os vestiários, onde a carga térmica foi reduzida em 40% devido às alterações propostas (proteção solar mais eficiente das áreas envidraçadas dos *sheds*, incremento da ventilação por efeito chaminé com a colocação de venezianas altas na fachada sudoeste e divisórias baixas nos vestiários) e onde foi acrescida a ventilação mecânica de 10 trocas/h, apresentaram níveis de conforto por mais de 75% do período de ocupação, que anteriormente não chegavam a 10%.

Já nas Oficinas e Planta-Piloto, os espaços ventilados naturalmente mostraram-se em conforto durante respectivamente 54,6% e 57% das horas ocupadas ao longo do ano. O valor apresentado na Tabela 10 para a Planta-Piloto não considerou a inclusão de ventilação mecânica de 20 trocas/h testada em simulação, pois não representou uma melhora significativa na média anual (ficando em torno de 2%). Isso indica que a ventilação natural do ambiente já está otimizada.

Avaliação de desempenho térmico do centro de convenções

Esse edifício tem planta circular e organiza-se em torno de um jardim central. É composto por salas multiuso independentes, um salão de eventos e um hall de acesso, todo ele coberto por uma membrana têxtil tensionada que protege o espaço da chuva e da radiação solar direta e que definiu o aproveitamento de iluminação natural nas salas.

Destacando-se da membrana, no ponto mais alto, tem-se um grande auditório e um foyer, ambos selados. Sob o auditório há uma praça de alimentação não confinada, voltada para o jardim (Figura 20).

O edifício tem alguns espaços com alta densidade de ocupação e necessidade de controle das condições ambientais. Por isso, determinou-se que esses locais fossem permanentemente condicionados artificialmente. Os requisitos de isolamento acústico foram decisivos nas etapas iniciais do projeto e determinaram a escolha dos materiais, resultando também em componentes com alto isolamento térmico. A adoção da membrana reduziu significativamente a radiação na cobertura e em algumas das paredes das salas, diminuindo os ganhos de calor pela envoltória.

Para a Área de Eventos considerou-se uma ocupação das 9h às 21h com carga térmica de 41W/m^2 , sendo que a carga de ocupação foi retirada durante o horário do almoço (13h) e jantar (18h). Para o restaurante e a lanchonete, a ocupação era das 8h às 21h com carga térmica de $7,1\text{W/m}^2$ na área de consumo e 20W/m^2 na cozinha.

Os ganhos de calor pela iluminação artificial foram considerados de 12W/m^2 após as 18h apenas. Na área de eventos não havia iluminação artificial durante o dia e, no restaurante, a carga era de 2W/m^2 entre 11h e 17h. Como carga de equipamentos, foram considerados 8W/m^2 para a área de restaurante durante as horas ocupadas. Os acessos ficam abertos para o exterior durante 24 horas.

Nas simulações iniciais, verificou-se condições de conforto por até 37,4% das horas ocupadas no restaurante, mas alterações nos materiais e no projeto interferiram na ventilação e aumentaram o ganho de calor, reduzindo esse valor para 12% na segunda simulação. O salão de eventos apresentou somente 15% das horas em conforto, principalmente devido à alta temperatura radiante causada pela transmissão solar na cobertura.

A partir daí, novas alterações foram propostas. As principais foram a duplicação da membrana sobre o hall de eventos e as alterações nas aberturas de ventilação para melhorar o fluxo de vento, apresentadas em conjunto com as demais estratégias na Figura 21.

A simulação termodinâmica foi informada por simulações de dinâmica dos fluidos para a determinação dos coeficientes de troca das áreas ventiladas, para a necessidade de aberturas e para os valores médios de velocidade de vento nas áreas ocupadas (Figura 22).

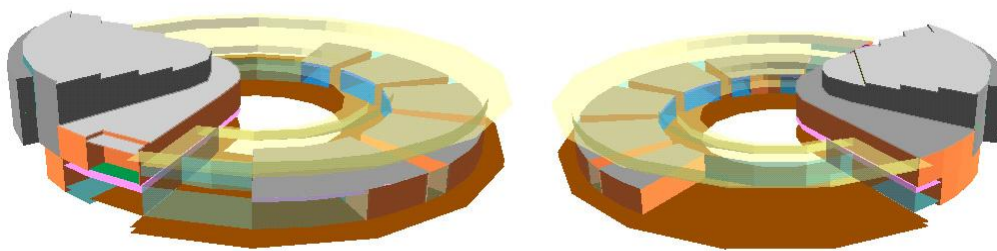


Figura 20 - Modelo de simulação térmica do Centro de Convenções

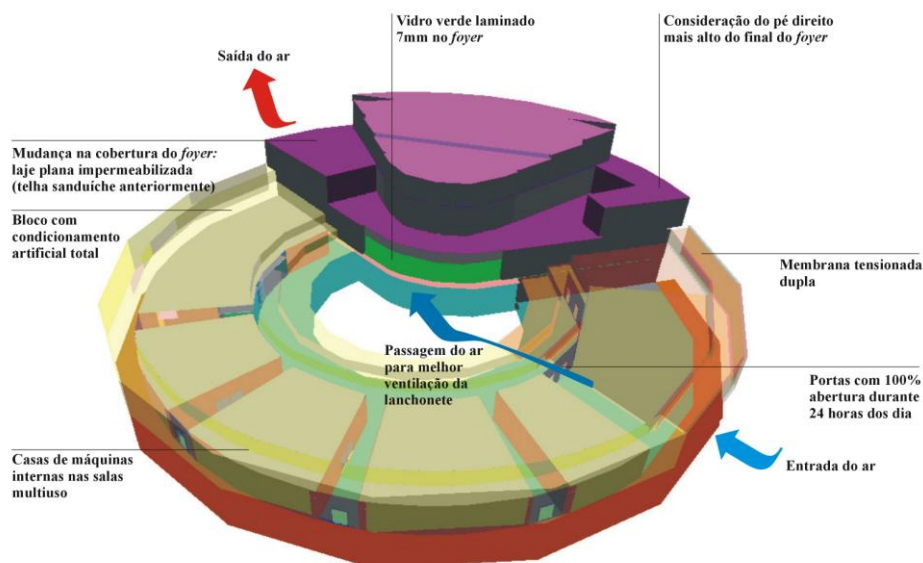


Figura 21 - Modelo esquemático do Centro de Convenções com as estratégias para o desempenho ambiental

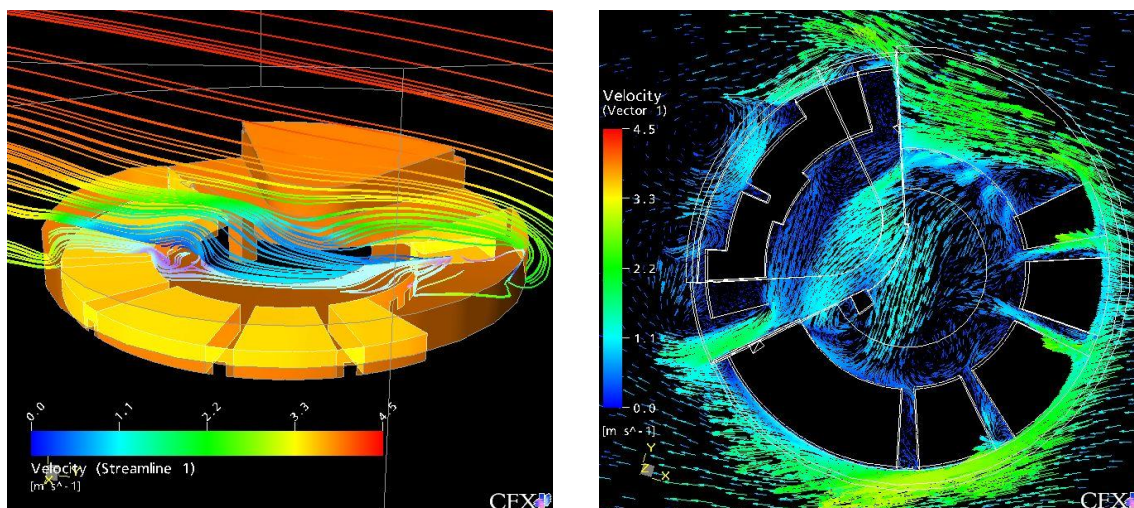


Figura 22 - Resultados para simulação de ventilação no Centro de Convenções: *streamline* e campo de velocidades a 1,5 m

Em função dos resultados, considerou-se uma velocidade do ar de 0,8 m/s, aumentando assim a porcentagem das horas de conforto. No caso do salão de eventos, esta pode ser considerada uma

abordagem conservadora, já que as velocidades encontradas estão próximas de 2,0 m/s. Também foi considerada uma parede dupla de concreto na

face externa do restaurante, reduzindo os ganhos de calor.

Como resultado o período em conforto para o restaurante foi elevado para 51% do tempo de ocupação. Esse número está muito próximo do valor encontrado no item 2.2.3. Em junho e julho, esse valor chega a 94% do tempo de ocupação, indicando que o potencial para condicionamento natural foi atingido.

No caso da área de eventos, a membrana dupla reduziu os ganhos solares e a temperatura superficial da face interna da cobertura, com um acréscimo das horas em conforto de 13% para 35%, considerando-se um PPD de 10%. Assumindo-se um PPD de 20%, obteve-se um cenário com 60% das horas do ano em conforto. Isso indica que, durante a maior parte do tempo, as temperaturas efetivas obtidas não estão distantes dos limites estabelecidos, já que uma leve extensão da zona de conforto leva à duplicação do período confortável. O resultado final foi considerado satisfatório para um espaço ventilado naturalmente, considerando-se a flexibilidade do uso e a função.

Considerações finais

Considerando-se as condições climáticas locais, os resultados de desempenho térmico nos ambientes com ventilação natural mostram a adequação arquitetônica ao clima.

A tipologia do edifício industrial teve um papel decisivo no desempenho das estratégias passivas, incluindo o pé-direito duplo e triplo, os fechamentos verticais com poucas aberturas e a cobertura em *shed*, que favoreceram a ventilação natural por efeito chaminé e o acesso da luz natural difusa. Sombreamento e ventilação natural foram as principais estratégias nesses edifícios, às quais se somam o isolamento térmico para o exterior e a inércia térmica no interior dos ambientes. No caso dos ambientes internos com elevada carga térmica a ventilação mecânica teve que ser introduzida, devido ao calor latente, principalmente de dezembro a fevereiro.

O melhor desempenho dos ambientes naturalmente ventilados foi encontrado no restaurante do Centro de Convenções, com 70% das horas de ocupação do ano dentro da zona de conforto, enquanto o percentual mais baixo foi na cozinha da Empreiteirópolis, com 51%, com PPD de 20%.

Para o ar condicionado, foram propostos parâmetros não usuais de operação visando à eficiência energética dentro dos limites do conforto. No projeto final, todas as áreas em que o

ar condicionado se mostrou necessário em algum período do ano foram consideradas totalmente condicionadas artificialmente, devido a razões técnicas, econômicas e, principalmente, culturais.

Tanto nos gabinetes dos Laboratórios como nos ambientes de trabalho do Prédio Central a estratégia de modo-misto foi descartada devido à não aceitação da mudança de estratégia de climatização por parte dos ocupantes. Contudo, com o projeto de janelas operáveis e o zoneamento da distribuição de ar (um *fan-coil* para cada unidade de laboratório), a opção de ventilação natural é dada aos usuários.

No Prédio Central, apesar dos estudos realizados, algumas características arquitetônicas, como piso elevado e forro rebaixado, resultaram em ambientes internos similares àqueles da cultura internacional do ambiente de trabalho. Já os gabinetes dos Laboratórios, com dimensões reduzidas e cargas térmicas relativamente baixas, além da massa térmica interna, apresentaram desempenho relativamente melhor, principalmente pela ventilação natural.

Concluindo, a experiência de projeto e da avaliação de desempenho ambiental desse trabalho foi pautada em uma abordagem contemporânea do processo de projeto na prática brasileira, com resultados bastante satisfatórios, tendo em vista o rigor das condições ambientais locais.

Referencias bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6401**: instalações centrais de ar-condicionado para conforto: parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro, 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em Ambientes Climatizados Artificialmente de uso Público e Coletivo**. Brasília, 2003. (Resolução RE9).

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55-1992**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55-2004**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2004.

CRAWLEY, Drury. **Curso Avançado em "Energy Plus"**. Compilado por Serviço de Comunicação Social da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Abril de 2008. (Notas de aula).

DE DEAR, Richard; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and preference**. Final Report, ASHRAE RP-884, Macquire University, 1997.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. Nova York: McGraw-Hill, 1970.

GONÇALVES, Joana Carla Soares. **A Sustentabilidade do Edifício Alto: uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana**. 2003. (Tese de doutorado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2003.

HOPPE, Peter. Different Aspects of Assessing Indoor and Outdoor Thermal Comfort. **Energy and Buildings**, Munique, v. 34, n. 6, p. 661-665, jul. 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 8996**: ergonomics: determination of metabolic heat production. Genebra, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7730**: moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genebra, 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 9920**: ergonomics of the thermal environment: estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. Genebra, 1995.

METAR. **Dados Climáticos do Aeroporto do Galeão 1998-2004**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2005.

METEOTEST. **Meteonorm 5.0**. Switzerland: the swiss federal office of energy. Suíça, 2003.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 15**: atividades e operações insalubres, anexo 3: limites e tolerância para exposição ao calor. Brasília, 1978.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 17**: ergonomia e segurança do trabalho. Brasília, 1973.

SZOKOLAY, S. Use of the New Effective Temperature. ET* in Practice. In: F. Pererra, PLEA 2001. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 18., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2001. p. 1003-1007.

UK Legislations. **Building Regulations 2000**. The stationery office limited. Londres, 2000.

Agradecimentos

Ao Eng. Fúlvio Vittorino, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), a Klaus Bode e Allan Harries, do BDSP Partnership, Londres. À Siegbert Zanettini e Érika Bataglia e à Petrobras, pela autorização da publicação das informações apresentadas nesse artigo.